

明 細 書

時間分解測定装置

技術分野

【0001】 この発明は、位置検出型電子増倍管 (Position-Sensitive Electron Multiplier Tube: P S - E M T) を利用する時間分解測定装置に関する。

背景技術

【0002】 発光現象の時間分解測定を行って、その二次元位置および時間を取得するための二次元時間分解測定装置が知られている。このような装置は、特開昭61-266942号公報、特開平10-150086号公報、およびエス・シャールボンノー (S. Charbonneau) らによる論文「レジスティブアノード光電子増倍管を用いた100 p s 分解能での二次元時間分解撮像 (Two-dimensional time-resolved imaging with 100-ps resolution using a resistive anode photomultiplier tube)」 (Rev. Sci. Instrum. 63 (11)、米国、アメリカン・インスティテュート・オブ・フィジックス (American Institute of Physics)、1992年11月、5315-5319頁) に開示されている。

発明の開示

【0003】 この発明は、時間分解測定の精度を高めることを目的とする。

【0004】 この発明の時間分解測定装置は、試料の励起によって発する量子線の位置情報およびタイミング情報を取得する。この時間分解測定装置は、試料の励起に同期して基準時間パルスを生成する信号発生器と、試料からの量子線を検出し、検出位置に応じた位置信号および検出タイミングに同期した検出タイミングパルスを生成する検出装置と、位置信号を用いて検出位置を算出する位置演算器と、基準時間パルスと検出タイミングパルスとの時間差を計測する時間差計測器と、位置演算器によって算出された前記検出位置と前記時間差測定器によって計測された時間差とを対応付けて記憶するデータ処理装置を備えている。検出装置は、位置検出型電子増倍管を有している。この電子増倍管は、前記量子線の

前記電子増倍管への入射位置に応じた位置に電子を生成し、その位置を維持しながら前記電子を増倍するマイクロチャンネルプレート、およびマイクロチャンネルプレートに電氣的に接続された出力端子を有している。検出タイミングパルスは、マイクロチャンネルプレートによって増倍された電子がマイクロチャンネルプレートから放出されるときに電位変化に応じて発生し、マイクロチャンネルプレートから出力端子を通じて時間差計測器へ送られる。データ処理装置は、マイクロチャンネルプレート上における検出タイミングパルスの発生位置と出力端子との距離に応じて時間差を補正し、補正された時間差を検出位置と対応付けて記憶する。

【0005】 マイクロチャンネルプレートは量子線の位置情報を維持するので、検出タイミングパルスはマイクロチャンネルプレート上において、試料上の量子線の発生位置に応じた位置に発生する。したがって、試料上の異なる位置から発した量子線は、マイクロチャンネルプレート上の異なる位置に検出タイミングパルスを発生させる。発生した検出タイミングパルスが出力端子へ到達するのに要する時間は、検出タイミングパルスの発生位置と出力端子との距離に依存する。このため、試料上の異なる位置から同じタイミングで発した量子線が、異なるタイミングで出力端子に到達する検出タイミングパルスを生成し、その結果、異なる時間差を生じさせることがある。本発明では、データ処理装置が検出タイミングパルスの発生位置と出力端子との距離に応じて時間差を補正し、量子線の発生位置の相違に応じた時間差の誤差を解消する。これにより、時間分解測定精度が高まる。

【0006】 量子線には、電子、イオン、 α 線、 β 線などの荷電粒子や、紫外線、X線、 γ 線などの光子、さらには中性子などが含まれる。試料の励起に伴う量子線の発生は、原子、分子などがエネルギーの低い状態から、熱、光、放射線などの外部刺激によって、より高いエネルギーの状態に移り、その状態が元に戻る際に、2つの状態のエネルギーの差を光等の量子線として放出する現象である

(上記特許文献1および非特許文献1を参照のこと)。半導体デバイスが自発的に、あるいは外部トリガ（信号パルス、動作開始パルス等）に応答して作動すると、デバイス中のトランジスタのスイッチング動作に伴ってトランジェント発光が起きることも知られている（上記特許文献2を参照のこと）。本発明において試料

5 の励起に伴う量子線の発生には、原子または分子が2つの状態のエネルギーの差を光等の量子線として放出する現象に加えて、半導体デバイスの動作時に観察されるトランジェント発光も含まれる。

【0007】 データ処理装置は、検出タイミングパルスがその発生位置から出力端子へ到達するのに要する時間を、時間差計測器によって計測された時間差から除去することによって時間差を補正してもよい。この場合、検出タイミングパ

10 ルスの発生位置と出力端子との距離に依存する成分が時間差から除去される。この結果、量子線の発生位置の相違に応じた時間差の誤差が解消され、時間分解測定

【0008】 データ処理装置は、マイクロチャンネルプレート上に複数のサンプリング点を設定し、各サンプリング点で発生する検出タイミングパルスのための補正データを取得して補間し、補間された補正データを用いて時間差を補正してもよい。補間によって少数のサンプルから多数の補正データを算出できる。これにより、補正データの取得に要する時間を短縮できる。

15

【0009】 データ処理装置は、試料の複数回の励起にわたって検出位置および時間差を蓄積してもよい。これは量子線を発する確率の低い試料の測定に有益である。

20

【0010】 データ処理装置は、蓄積された時間差を用いて、特定の検出位置に対応付けられた時間差のヒストグラムを作成してもよい。このヒストグラムは、ある位置での量子線発生のタイミングを求めるために使用できる。求められた量子線発生タイミングは、動作時に低い確率で量子線を発する半導体デバイスの動作解析に利用できる。

25

【0011】 試料は、動作時に量子線を発しうる複数の半導体デバイスを含む回路を有していてもよい。試料の励起は、回路を駆動して複数の半導体デバイスを順次に動作させることであってもよい。データ処理装置は、半導体デバイスの位置に対応する検出位置を特定し、特定された検出位置におけるヒストグラムのピークに対応する時間差を算出してもよい。ヒストグラムのピークは、ある検出位置において量子線の発生が最も高い頻度で検出された時間差を示している。したがって、この時間差は、その検出位置に対応する半導体デバイスから量子線が発生するタイミングとして扱うことができる。複数の半導体デバイスの量子線発生タイミングを算出すれば、それらの半導体デバイスを含む回路の動作を解析することができる。

【0012】 電子増倍管は、量子線を光電効果によって光電子に変換するフォトカソードを有する位置検出型光電子増倍管であってもよい。この場合、マイクロチャンネルプレートはフォトカソードに対向させて配置され、フォトカソードから光電子を受け取って二次電子を生成し増倍する。

【0013】 本発明の前記および他の目的と新規な特徴は、以下の説明を添付図面と合わせて読むことにより、より完全に明らかになる。ただし、図面は単なる例示に過ぎず、本発明の技術的範囲を限定するものではない。

図面の簡単な説明

【0014】 図1は、実施形態に係る時間分解測定装置の構成を示すブロック図である。

【0015】 図2は、試料に含まれる集積回路を示す概略図である。

【0016】 図3は、マイクロチャンネルプレートを示す概略平面図である。

【0017】 図4は、インバータ中のトランジスタの発光タイミングを示す図である。

【0018】 図5は、図4の折れ線グラフの近似曲線を示す図である。

【0019】 図6は、マイクロチャンネルプレートの表面上における複数の検

出位置を示す概略平面図である。

【0020】 図7は、複数の検出位置に対応する検出時刻のディレイの分布を示す図。

【0021】 図8は、補正データの測定方法の説明するための概略図である。

5 【0022】 図9は、有効領域上のサンプリング点を示す図である。

【0023】 図10は、サンプリング点について測定した検出時刻のディレイを3D表示する図である。

【0024】 図11は、補間後のディレイを3D表示する図である。

10 【0025】 図12は、インバータチェーン中のトランジスタに対応した検出時刻のディレイの分布を示している。

【0026】 図13は、時間分解測定の手順の一例を示すフローチャートである。

【0027】 図14は、時間分解測定の手順の他の例を示すフローチャートである。

15 発明を実施するための最良の形態

【0028】 以下では、添付図面を参照しながら、本発明の好適な実施形態を詳細に説明する。理解の容易のため、図面に共通の同一または等価な要素には同様の参照番号を使用し、重複する説明を省略する。

20 【0029】 図1は、本実施形態に係る時間分解測定装置100の構成を示すブロック図である。装置100は、試料10から発する光15を検出し、発光の二次元位置およびタイミングを測定する。装置100は、半導体テスト12、位置検出型光電子増倍管（Position Sensitive Photomultiplier Tube：PS-PMT）14、位置時間測定回路16、およびデータ処理装置18を有している。

25 【0030】 本実施形態では、試料10の一例として、半導体集積回路（IC）を搭載するチップを用意する。図2は、試料10上のICを示す概略図である。このICは、直列接続された12個のインバータ22₁～22₁₂を有するインバ

ータチェーン20である。インバータチェーン20では、初段のインバータ22₁から最終段のインバータ22₁₂まで矢印24の方向に沿って信号が順次に伝播する。隣り合う2個のインバータ間の信号伝播時間は理論上70psに設計されている。インバータを構成するMOSトランジスタはスイッチング時に発光することがある。したがって、装置100を用いて発光の位置とタイミングを計測すれば、どのトランジスタがいつスイッチングを行ったかを判別できる。これはインバータチェーン20の動作解析を可能にする。

【0031】 半導体テスト12は、試料10を励起して発光を生じさせるための励起装置である。テスト12は、試料10上のインバータチェーン20に電氣的に接続され、駆動電圧を印加する。また、テスト12は、駆動電圧の印加に同期して時間基準パルスを生成する信号発生器12aを含んでいる。時間基準パルスは位置時間測定回路16へ送られる。

【0032】 位置検出型光電子増倍管14は、試料10からの光を電子に変換し、その電子をその二次元位置を維持しながら増幅する。光電子増倍管14は、フォトカソード、マイクロチャンネルプレート(MCP)およびレジスティブアノードを有している。マイクロチャンネルプレートは、フォトカソードとレジスティブアノードの間に配置されている。マイクロチャンネルプレートの前面はフォトカソードと対向し、後面はレジスティブアノードと対向している。

【0033】 図3はマイクロチャンネルプレートを示す概略平面図である。図面の簡単のため、図3ではマイクロチャンネルプレートのチャンネルの図示は省略されている。マイクロチャンネルプレート30の両端面には、電極30aとして導電性材料が蒸着されている。マイクロチャンネルプレート30の周縁は、円環状の金属フランジ32によって覆われている。フランジ32の一箇所にリード端子34が取り付けられている。リード端子34は、マイクロチャンネルプレート30の端面上の電極30aと電氣的に導通している。リード端子34はリード線によって位置時間測定回路16に接続されている。後述するように、マイクロ

チャンネルプレート 30 では、光の検出タイミングに同期して電氣的なパルス信号が生成される。このパルス信号はリード端子 34 を通じて回路 16 に送られる。

【0034】 位置時間測定回路 16 は、テスト 12 および光電子増倍管 14 の双方に電氣的に接続されている。回路 16 は、光電子増倍管 14 から送られる信号を用いて検出位置を算出する位置演算器として機能する。また、回路 16 は、テスト 12 から送られる基準時間パルスと光電子増倍管 14 から送られる検出タイミングパルスとの時間差を計測する時間差計測器としても機能する。この時間差は、基準時間パルスを基準とした検出時刻を示す。回路 16 によって求められた検出位置および検出時刻はデータ処理装置 18 に送られる。

【0035】 データ処理装置 18 は、位置時間測定回路 16 から検出位置および検出時刻を受け取り、これらを互いに対応付けて記憶する。処理装置 18 は、例えばパーソナルコンピュータである。処理装置 18 は、CPU、記憶装置、キーボードおよびマウス、ならびにディスプレイを有している。記憶装置には、CPU によって実行されるデータ処理プログラムが格納されている。

【0036】 以下では、時間分解測定装置 100 の動作を説明する。テスト 12 が試料 10 上のインバータチェーン 20 を駆動すると、複数のインバータ 22 が約 70 ps の間隔で順次に動作する。このとき、ある確率でインバータ 22 中のトランジスタから光 15 が発する。光電子増倍管 14 は光 15 をフォトカソードにて受け取る。フォトカソードは、光電効果によって光 15 を光電子に変換する。この光電子は、フォトカソードおよびマイクロチャンネルプレート間に印加された電界によってマイクロチャンネルプレートの前面、すなわち入力面に移動する。光電子のマイクロチャンネルプレートへの入射位置は、光 15 のフォトカソードへの入射位置に対応している。

【0037】 マイクロチャンネルプレートは、光電子の入射位置に一つ以上の二次電子を生成し、その二次電子をその二次元位置を維持しながら増倍する。よ

り具体的には、マイクロチャンネルプレートは、非常に細いガラスパイプを多数束ねた構造を有している。このガラスパイプがチャンネルである。チャンネルの内壁は、電気抵抗体であり、電子放出体でもある。それぞれのチャンネルは独立した電子増倍器として機能する。マイクロチャンネルプレートが感応する量子（例えば、本実施形態における光電子）が一つのチャンネルの内壁に入射すると、その内壁から一つ以上の電子が放出される。放出された電子は、マイクロチャンネルプレートの両端面間に印加された電界によって加速され、再び内壁に衝突し、二次電子を放出させる。二次電子は内壁への衝突を繰り返しながらチャンネルに沿って進行し、それによって増倍される。二次電子の二次元位置は、チャンネルによって維持される。二次電子は、マイクロチャンネルプレートの後面に到達すると、マイクロチャンネルプレートおよびレジスティブアノード間に印加された電界によって、マイクロチャンネルプレートの後面、すなわち出力面から放出され、レジスティブアノードに集められる。

【0038】 レジスティブアノードは、片面に均一な抵抗層が設けられた導体板である。レジスティブアノードの周縁部の四箇所には、信号読み出し用の電極が設けられている。これらの電極は、位置時間測定回路16に電氣的に接続されている。レジスティブアノードに二次電子が入射すると、これらの読み出し電極は電荷パルスを出力する。レジスティブアノードに入射した二次電子の二次元位置は、これらの電荷パルスが有する電荷量に基づいて求められる。このようにレジスティブアノードは、光15の検出位置に応じた信号を生成し、位置時間測定回路16に送る。

【0039】 回路16は、光電子増倍管14のレジスティブアノードの四隅の電極から電荷パルスを受け取り、重心検出によってレジスティブアノード上における二次電子の二次元位置を算出する。この二次元位置は、試料10上における発光の二次元位置と対応している。このようにして光15の検出位置が求められる。この検出位置はデータ処理装置18に送られる。

【0040】 さらに、光電子増倍管14は、光15の検出タイミングに同期してパルスを生成する。この検出タイミングパルスはマイクロチャンネルプレート30から取り出される。以下では、図3を参照しながら、検出タイミングパルスの生成について説明する。

5 【0041】 マイクロチャンネルプレート30の後面（出力面）のうちレジスティブアノードによって二次電子を収集できるのは、符号36で示される正方形の領域である。この領域を以下では「有効領域」と呼ぶ。インバータ22₁～22₁₂から光が発すると、インバータ22₁～22₁₂に対応した有効領域36中の位置38₁～38₁₂に光電子が収集される。これらの位置38からレジスティブアノード
10 へ二次電子が放出されると、マイクロチャンネルプレート30の出力面の電位が瞬時的に上昇する。続いて、マイクロチャンネルプレート30に接続された電気回路から位置38へ電子が流入し、出力面の電位がすぐに所定の定常電位に戻される。この電子の流れが、上述した検出タイミングパルスである。このパルスは
15 マイクロチャンネルプレート30の出力面上を伝播し、フランジ32、リード端子34および上記の電気回路、すなわちパルス読み出し回路を通して、位置時間測定回路16に到達する。

20 【0042】 回路16は、テスト12が試料10上のインバータチェーン20を駆動させた直後に基準時間パルスをテスト12から受け取り、その後、マイクロチャンネルプレート30から検出タイミングパルスを受け取る。回路16は、時間電圧変換器（Time-to-Amplitude Converter : TAC）を有しており、基準時間パルスおよび検出タイミングパルスはこの時間電圧変換器に送られる。時間電圧変換器は、基準時間パルスと検出タイミングパルスとの時間差に応じたレベルの電圧信号を生成する。上述のように、この時間差は、試料10の励起時点を基準とする光15の検出時刻と等価である。以下では、時間差に応じたこの信号を
25 「検出時刻信号」と呼ぶ。検出時刻信号は回路16からデータ処理装置18に送られる。

【0043】 データ処理装置18は、回路16から検出位置および検出時刻信号を受け取り、検出時刻信号が示す検出時刻を補正した後、検出位置と検出時刻とを対応付けて記憶装置に格納する。検出時刻の補正については後で詳細に説明する。

5 【0044】 トランジスタがスイッチングの際に発光する確率は非常に小さいので、試料10は繰り返し励起され、検出位置および検出時刻がデータ処理装置18に蓄積される。蓄積されたデータはさまざまに利用することができる。たとえば、データ処理装置18は、特定の時間にわたって検出位置ごとに発光回数を計数し、得られたカウント数に応じた輝度を検出位置に対応する画素に割り当てた二次元画像を生成することができる。また、データ処理装置18は、蓄積された検出時刻を用いて、特定の検出位置における検出時刻のヒストグラムを作成することができる。このヒストグラムでは、横軸が検出時刻であり、縦軸が発光回数である。ヒストグラムのピークは、特定の検出位置において発光が高い頻度で検出された時刻を示している。したがって、ピークに対応する検出時刻は、その
10 検出位置に対応するインバータ22中のトランジスタがスイッチングを行うタイミングとみなすことができる。各インバータ22に対応する検出位置についてヒストグラムのピークに対応する検出時刻を算出すれば、一連のインバータ22の動作タイミングを把握することができる。これにより、インバータチェーン20の動作解析が可能である。

20 【0045】 以下では、データ処理装置18において検出時刻が補正される理由を説明し、その後、補正処理を具体的に説明する。本発明者は、当初、データ処理装置18に時間差を補正させることなく検出位置および検出時刻を記憶させていた。しかし、これはインバータ22₁～22₁₂のような複数の半導体デバイスの連続的な動作タイミングを解析する場合には好ましくないことに気づいた。図
25 4および図5を参照しながら、この点について説明する。

【0046】 図4は、検出時刻を補正した場合と補正しなかった場合の双方に

において取得されたデータに基づくインバータ 2 2₁～2 2₁₂の発光タイミングを示している。図 4 において、4 0 は検出時刻を補正しない場合の発光タイミングを示し、4 2 は検出時刻を補正した場合の発光タイミングを示している。図 5 はこれらの折れ線グラフ 4 0 および 4 2 の近似曲線を示している。図 5 において、5 0 は検出時刻を補正しない場合の近似曲線を示し、5 2 は検出時刻を補正した場合の近似曲線を示している。これらのグラフにおいて横軸はインバータ 2 2₁～2 2₁₂に含まれるトランジスタを示し、縦軸は検出時刻を示す。横軸において 1 n、3 n、5 n、7 n、9 n および 1 1 n はそれぞれインバータ 2 2₁、2 2₃、2 2₅、2 2₇、2 2₉ および 2 2₁₁に含まれる n-FET を示し、2 p、4 p、6 p、8 p、1 0 p および 1 2 p は、それぞれインバータ 2 2₂、2 2₄、2 2₆、2 2₈、2 2₁₀ および 2 2₁₂に含まれる p-FET を示している。縦軸の検出時刻は、上述のように、データ処理装置 1 8 に蓄積された検出位置および検出時刻を用いて各インバータ 2 2 についてヒストグラムを作成し、ヒストグラム中のピークに対応する検出時刻を算出することにより取得される。

【0 0 4 7】 上述のように、インバータチェーン 2 0 は、インバータ 2 2₁～2 2₁₂中のトランジスタが一定の時間間隔で順次にスイッチングを行うように設計されている。したがって、測定が正確であれば、グラフ 5 0 の傾きは一定のはずである。しかし、実際には、グラフ 5 0 の傾きはトランジスタがリード端子 3 4 に近くなるにつれて低下する。これは、測定結果においてスイッチングの時間間隔が徐々に短くなることを意味する。

【0 0 4 8】 本発明者は、測定結果に見られるスイッチングタイミングの不均一を、マイクロチャンネルプレート 3 0 上における検出タイミングパルスの伝播時間のばらつきに起因する誤差と考えている。以下では、この点について説明する。

【0 0 4 9】 図 3 に示されるように、検出タイミングパルスの発生位置 3 8 とリード端子 3 4 との距離はインバータ 2 2 の位置に応じて異なる。このため、異

なるインバータ 2 2 から発した光によって生成された検出タイミングパルスは、その発生位置 3 8 からリード端子 3 4 へ伝播するのに要する時間が異なる。例えば、図 3 に示されるように、インバータ 2 2₁ の発光に対応する検出位置 3 8₁ とリード端子 3 4 との距離は l_1 であり、インバータ 2 2₆ の発光に対応する検出位置 3 8₆ とリード端子 3 4 との距離は l_6 である。したがって、検出タイミングパルスが検出位置 3 8₁ および 3 8₆ の各々からリード端子 3 4 へ伝播するのに要する時間には、単純に考えて $(l_1 - l_6) / c$ の違いがあると推定される。ここで、 c は電磁波の速度を表す。検出時刻は、光 1 5 が実際に検出された時点、すなわち検出タイミングパルスの発生時点から、検出タイミングパルスの位置時間測定回路 1 6 への伝播に要する時間だけ遅延する。この遅延（ディレイ）が検出位置 3 8₁ ~ 3 8₁₂ に応じて異なるため、測定されるスイッチングタイミングの時間間隔が不均一になると考えられる。なお、検出タイミングパルスの伝播時間は、フランジ 3 2 の形状や、マイクロチャンネルプレート 3 0 の構造および材質など、さまざまな要因によって複雑に影響される。

【0050】 なお、リード端子の数は 1 本に限定されず、ディレイの絶対値を減少させる（検出位置 3 8 からリード端子 3 4 までの距離を減少させる）観点から複数本設置してもよい。その際、複数のリード端子は同じ長さであることが好ましい。リード端子 3 4 の数が無限大の場合に相当する例として、リード端子の代わりにコーン状の電極を使用すれば、ディレイの絶対値を最小限に抑えることができる。

【0051】 図 6 はマイクロチャンネルプレート 3 0 上における複数の検出位置 P 1 ~ P 1 4 を示す概略平面図であり、図 7 はそれらの位置に応じた検出時刻のディレイを示している。図面の簡単のため、図 6 ではマイクロチャンネルプレート 3 0 のチャンネルの図示は省略されている。図 7 に示されるディレイの分布は、リード端子 3 4 から遠い位置で発生した検出タイミング信号ほどリード端子 3 4 に到達するまでの時間が長いことを反映している。なお、各検出位置に対応

したディレイは、電磁界シミュレータまたは高周波回路シミュレータを用いて計算するか、あるいは後述するような方法によって測定することができる。

【0052】 検出位置に応じた検出時刻のディレイのばらつきは、試料10上の一箇所から発する光を繰り返し測定する用途では問題とならない。しかし、インバータチェーン20のように、異なる位置に配置された複数の半導体デバイスの連続的な動作タイミングを解析する場合には問題が生じる。図3に示されるように、最終段に近いインバータ22ほど、出力端子34に近い検出位置38で検出タイミングパルスが発生させる。したがって、最終段に近いインバータ22ほど検出時刻のディレイが短い。このようなディレイの不均一が、一定であるはずのスイッチング間隔が徐々に短縮するという測定結果を生じさせる。

【0053】 そこで、本発明者は、検出位置に応じたディレイのばらつきをデータ処理装置18に補正させることにした。この補正処理は、マイクロチャンネルプレート30上におけるディレイの分布を反映した補正データを使用して行われる。この補正データは実験によって取得することもできるし、電磁界シミュレータまたは高周波回路シミュレータを用いた計算により取得することもできる。

【0054】 以下では、補正データの測定方法の一例を説明する。図8は測定方法を示す概略図である。この方法では、時間分解測定装置100におけるテスト12の代わりにピコ秒またはサブナノ秒のパルスレーザ光源40を使用し、レーザ光の検出位置に応じたディレイの分布を測定する。レーザ光源40は、パルスレーザ光を放出するとともに、その放出に同期して時間基準信号を出力する。この時間基準信号は位置時間測定回路16へ送られる。光源40には光ファイバ42が接続されている。光源40から発したパルスレーザ光は光ファイバ42中を伝搬し、レンズ44に向かって出射する。レーザ光はレンズ44によって集束され、光電子増倍管14のフォトカソード50に入射する。フォトカソード50での光電効果によって発生した光電子はマイクロチャンネルプレートによって増倍され、レジスティブアノード52に向けて放出される。このときに発生する検

出タイミングパルスは、マイクロチャンネルプレート 30 の後面上を伝播してリード端子 34 に到達し、そこから位置時間測定回路 16 へ送られる。レジスティブアノード 52 からは、レーザパルス光の検出位置に応じた信号が回路 16 に送られる。回路 16 はレジスティブアノードからの信号に基づいて検出位置を算出し、データ処理装置 18 に送る。また、回路 16 は、光源 40 からの時間基準パルスと検出タイミングパルスとの時間差に応じた信号を生成し、データ処理装置 18 に送る。この方法では、この時間差を、検出位置に応じた検出時刻のディレイとして扱う。データ処理装置 18 は、回路 16 から送られた検出位置とディレイとを対応付けて記憶する。X-Y ステージ（図示せず）を用いて光ファイバの出力端 43 を二次元的に移動させながらフォトカソード 50 の様々な位置に光を入射させ、データ処理装置 18 に検出位置とディレイを蓄積する。

【0055】 データ処理装置 18 は、マイクロチャンネルプレート 30 上の有効領域 36 に 512×512 、すなわち約 26 万個の画素を割り当てる。これらの画素の一つ一つに光を入射させてディレイを測定する場合、一画素あたりの測定時間を 10 秒程度に設定しても極めて膨大な時間が必要となり、現実的でない。そこで、数 10 個の画素についてだけディレイを測定し、他の画素については補間法によってディレイを算出することが効率的である。

【0056】 具体的には、図 9 に示されるように、有効領域 36 を仮想のメッシュ 53 によって分割し、メッシュ 53 中の 25 個の交点 54 のみについてディレイを測定する。つまり、これらの交点 54 はサンプリング点である。図 10 は、サンプリング点 54 について測定したディレイの分布を 3D 表示している。サンプリング点 54 の間の位置に対応したディレイは二次元スプライン補間によって算出する。図 11 は、補間によって得られたディレイの分布を 3D 表示している。このような補間されたディレイ分布が補正データとして使用される。

【0057】 図 12 は、図 11 の補正データに基づくインバータチェーン 20 中のトランジスタに対応したディレイを示している。図 12 に示されるように、

前段のトランジスタほどディレイが大きい。

【0058】 データ処理装置18は、試料10の時間分解測定によって回路16から検出時刻を取得した後、その検出時刻から補正データを減算する。すなわち、各検出位置に対応する検出時刻から同じ検出位置に対応するディレイが減算される。この減算により、検出時刻に含まれる検出タイミングパルスの伝播時間が除去される。これにより、検出タイミングパルスの伝播時間のばらつきに起因する検出時刻の誤差を補正することができる。データ処理装置18は、こうして補正された検出時刻を検出位置に対応付けて記憶する。したがって、時間分解測定の精度を高めることができる。実際、図4のグラフ42および図5のグラフ52に示されるように、この補正によってインバータ22₁～22₁₂中のトランジスタからの発光の検出時刻がほぼ等間隔となり、設計理論と合致するようになる。

【0059】 補正データの取得は、図13に示されるように試料10の時間分解測定の前であってもよいし、図14に示されるように時間分解測定の後であってもよい。

【0060】 図13に示される手順では、まず、図8を参照して上述した方法によって補正データを取得する（ステップS130）。この補正データはデータ処理装置18内の記憶装置に格納される（ステップS132）。その後、装置100は、図1を参照して上述した方法によって、インバータチェーン20からの発光の時間分解測定を実行する（ステップS134）。データ処理装置18は、得られた測定データから補正データを減算し、測定データに含まれる時間誤差を補正する（ステップS136）。補正後の測定データは、記憶装置に格納されるとともに、図4に示されるような折れ線グラフの形でデータ処理装置18のディスプレイ上に表示される（ステップS138）。

【0061】 一方、図14に示される手順では、まず、装置100を用いてインバータチェーン20の時間分解測定を実行し（ステップS140）、得られた測定データをデータ処理装置18内の記憶装置に格納する（ステップS142）。そ

の後、図 8 に示される方法によって時間誤差の補正データを取得する（ステップ S 1 4 4）。データ処理装置 1 8 は、記憶装置から測定データを読み出し、そこから補正データを減算して時間誤差を補正する（ステップ S 1 4 6）。補正された測定データは記憶装置に格納されるとともに、ディスプレイ上に表示される（ステップ S 1 4 8）。

【0062】 以上、本発明をその実施形態に基づいて詳細に説明した。しかし、本発明は上記実施形態に限定されるものではない。本発明は、その要旨を逸脱しない範囲で様々な変形が可能である。

【0063】 上記実施形態では、図 8 に示される測定によって補正データを取得する。しかし、計算によって補正データを取得してもよい。例えば、上記のディレイ分布は、電磁界シミュレータまたは高周波回路シミュレータを用いて算出することができる。

【0064】 本明細書では、「光電子増倍管（PMT）」は「電子増倍管（EMT）」の一態様である。上記実施形態は、位置検出型光電子増倍管（PS-PMT）を使用する。しかし、本発明では、試料から発する量子線の種類に応じて他の任意の位置検出型電子増倍管（PS-EMT）を使用することができる。マイクロチャンネルプレートが電子線のみならず、紫外線（UV および VUV）、X 線、 α 線、荷電粒子、中性子など、他の量子線に対して直接、感度を有することはよく知られている。PS-PMT を用いるか PS-EMT を用いるかは、検出対象物から発する量子線の種類に応じて適宜選択される。

【0065】 上記実施形態では、位置検出型のアノードとしてレジスティブアノードが使用されている。このほかに、他の任意の位置検出型アノード、例えばマルチアノード、CR チェーンアノード、クロスワイヤアノード、または半導体素子位置検出素子（PSD）を使用してもよい。また、二次電子を光学像に変換する蛍光板をアノードとして使用し、その光学像をイメージセンサを用いて撮像することにより二次電子の位置を測定してもよい。また、蛍光板とイメージセン

サとをファイバプレートを通じてファイバカップリングしてもよい。これらの位置検出は、一次元であっても二次元であってもよい。

【0066】 上記実施形態では、半導体集積回路の動作解析を取り上げている。しかし、本発明に係る時間分解型検出を利用可能なアプリケーションは幅広く、TOF (Time Of Flight) 応用をはじめとした様々な計測手法、例えば、二次イオン質量分析 (SIMS)、イオン散乱分光 (ISS)、アトムプローブなどに本発明を適用することができる。

産業上の利用可能性

【0067】 本発明の時間分解測定装置は、検出位置に応じた検出時刻ディレイの不均一を補正することにより、検出時刻の誤差を解消し、時間分解測定の精度を高めることができる。

請求の範囲

1. 試料の励起によって発する量子線の位置情報およびタイミング情報を取得する時間分解測定装置であって、

前記試料の励起に同期して基準時間パルスを生成する信号発生器と、

5 前記量子線を検出し、検出位置に応じた位置信号および検出タイミングに同期した検出タイミングパルスを生成する検出装置と、

前記位置信号を用いて前記検出位置を算出する位置演算器と、

前記基準時間パルスと前記検出タイミングパルスとの時間差を計測する時間差計測器と、

10 前記位置演算器によって算出された前記検出位置と、前記時間差測定器によって計測された前記時間差とを対応付けて記憶するデータ処理装置と、
を備え、

前記検出装置は、位置検出型電子増倍管を有しており、

前記電子増倍管は、前記量子線の前記電子増倍管への入射位置に応じた位置に
15 電子を生成し、その位置を維持しながら前記電子を増倍するマイクロチャンネルプレート、および前記マイクロチャンネルプレートに電氣的に接続された出力端子を有しており、

前記検出タイミングパルスは、前記マイクロチャンネルプレートによって増倍された電子が前記マイクロチャンネルプレートから放出されるとき電位変化に応じて発生し、前記マイクロチャンネルプレートから前記出力端子を通じて前記時間
20 差計測器へ送られ、

前記データ処理装置は、前記マイクロチャンネルプレート上における前記検出タイミングパルスの発生位置と前記出力端子との距離に応じて前記時間差を補正し、補正された時間差を前記検出位置と対応付けて記憶する、
25 時間分解測定装置。

2. 前記データ処理装置は、前記検出タイミングパルスが前記発生位置

から前記出力端子へ到達するのに要する時間を、前記時間差計測器によって計測された時間差から除去することによって前記時間差を補正する、請求の範囲第1項に記載の時間分解測定装置。

3. 前記データ処理装置は、前記マイクロチャンネルプレート上に複数の
5 のサンプリング点を設定し、各サンプリング点で発生する前記検出タイミングパルスのための補正データを取得して補間し、補間された補正データを用いて前記時間差を補正する、請求の範囲第1項または第2項に記載の時間分解測定装置。

4. 前記データ処理装置は、前記試料の複数回の励起にわたって前記検
10 出位置および前記時間差を蓄積する、請求の範囲第1項～第3項のいずれかに記載の時間分解測定装置。

5. 前記データ処理装置は、蓄積された前記時間差を用いて、特定の
前記検出位置に対応付けられた前記時間差のヒストグラムを作成する、請求の範囲第4項に記載の時間分解測定装置。

6. 前記試料は、動作時に光を発しうる複数の半導体デバイスを含む回
15 路を有しており、

前記試料の励起は、前記回路を駆動して前記複数の半導体デバイスを順次に動作させ、

前記データ処理装置は、前記半導体デバイスの位置に対応する前記検出位置を
20 特定し、特定された前記検出位置における前記ヒストグラムのピークに対応する前記時間差を算出する、

請求の範囲第5項に記載の時間分解測定装置。

7. 前記位置検出型電子増倍管は、前記量子線を光電効果によって光電
子に変換するフォトカソードを有する位置検出型光電子増倍管であり、

前記マイクロチャンネルプレートは、前記フォトカソードに対向させて配置さ
25 れ、前記フォトカソードから前記光電子を受け取って二次電子を生成し増倍する、

請求の範囲第 1 項～第 6 項のいずれかに記載の時間分解測定装置。

図1

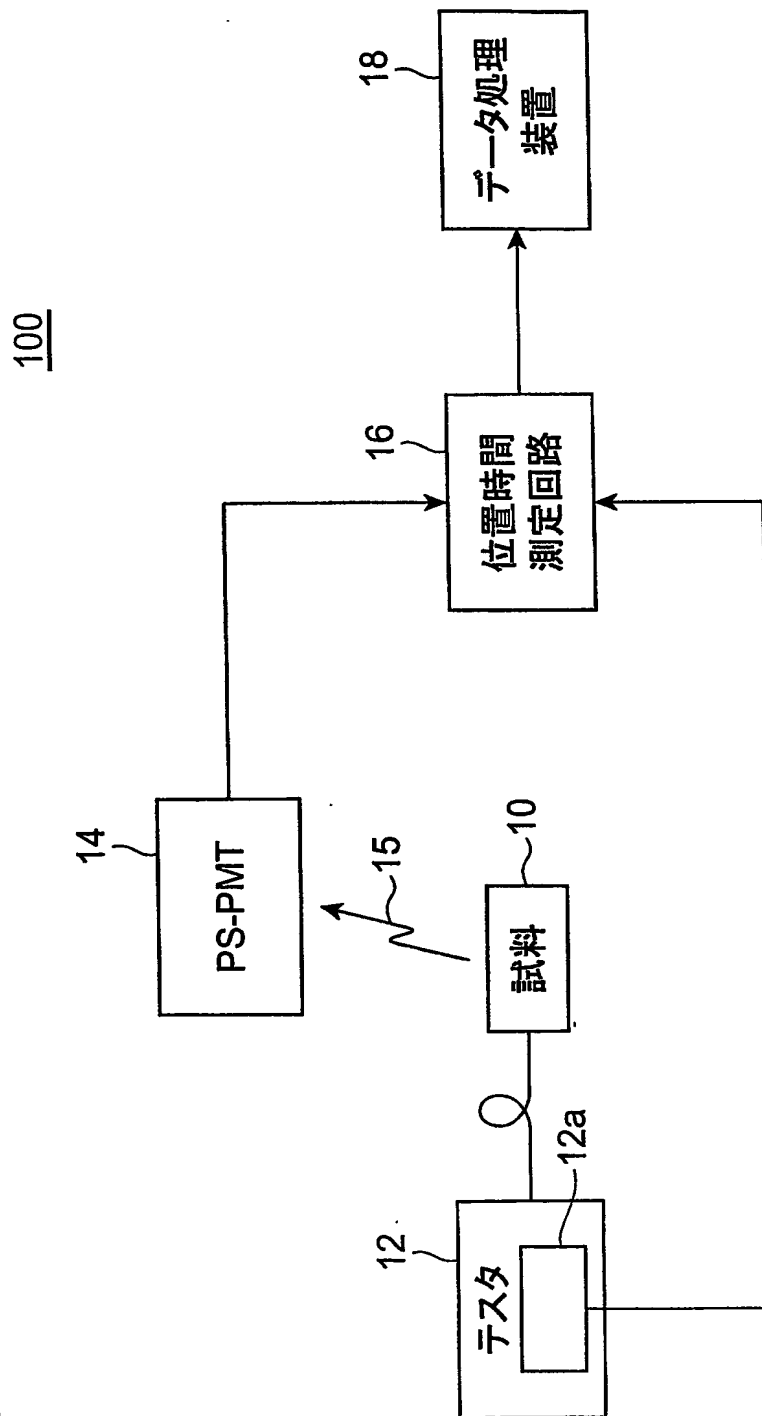


図2

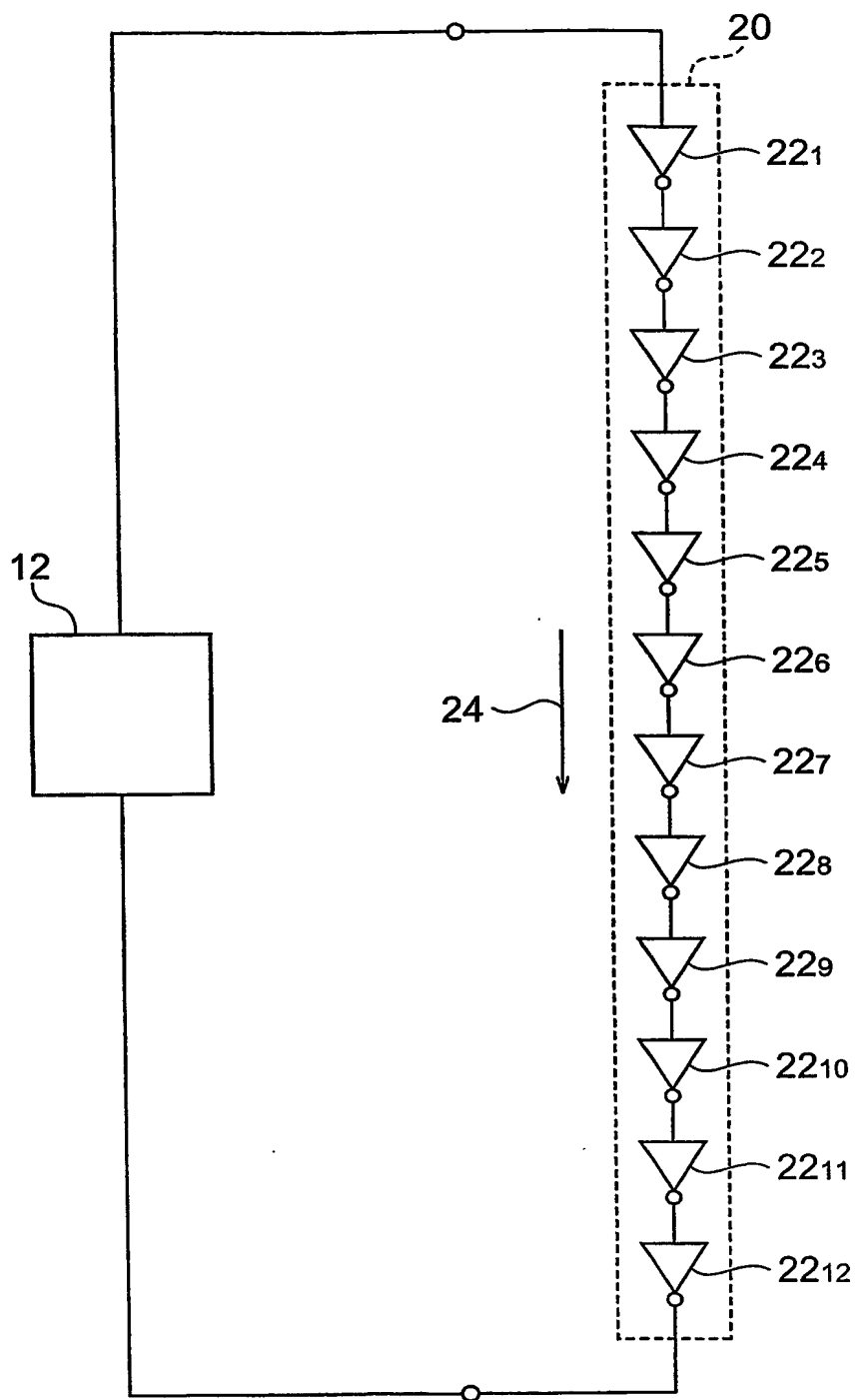


図3

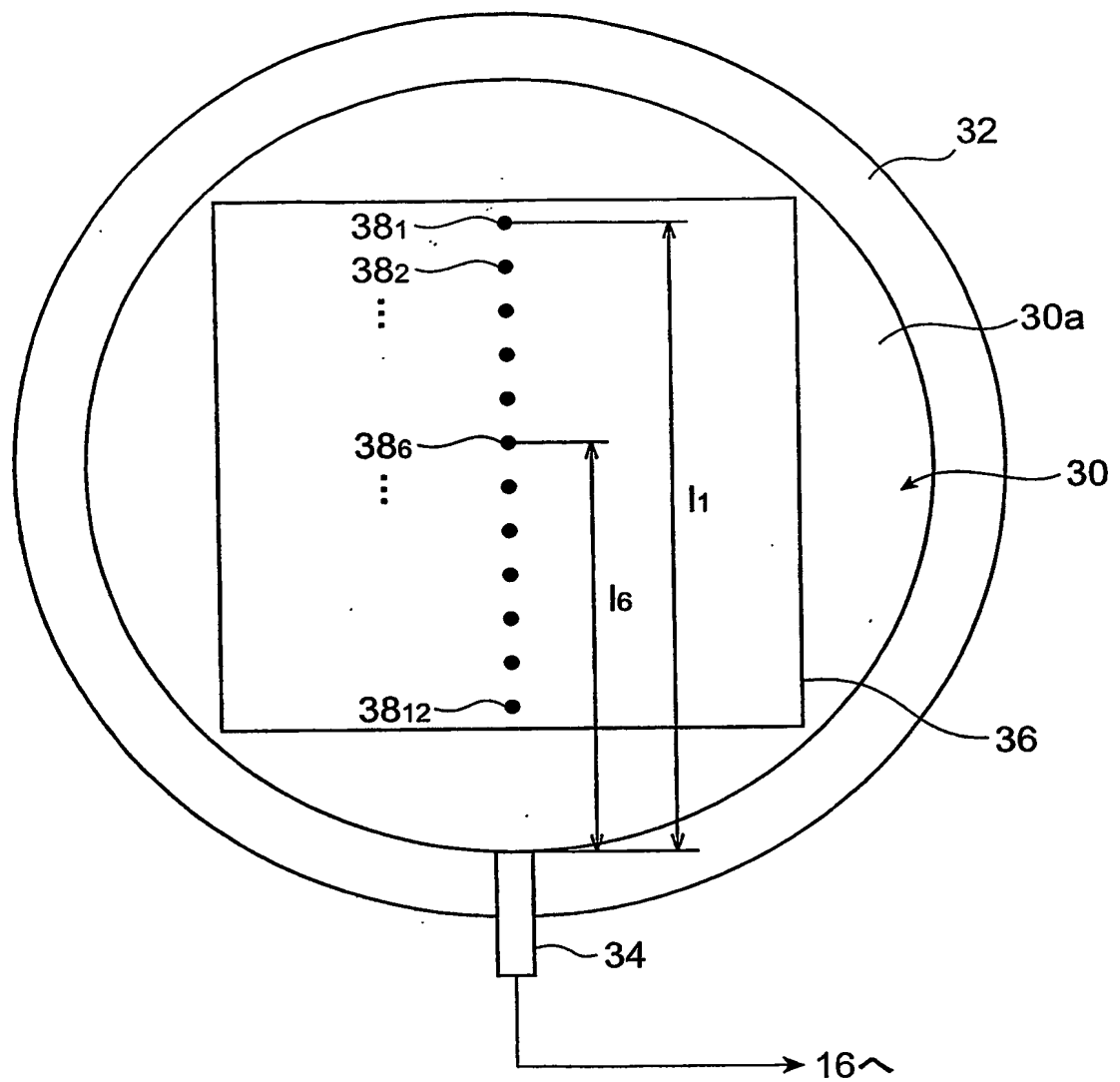


図4

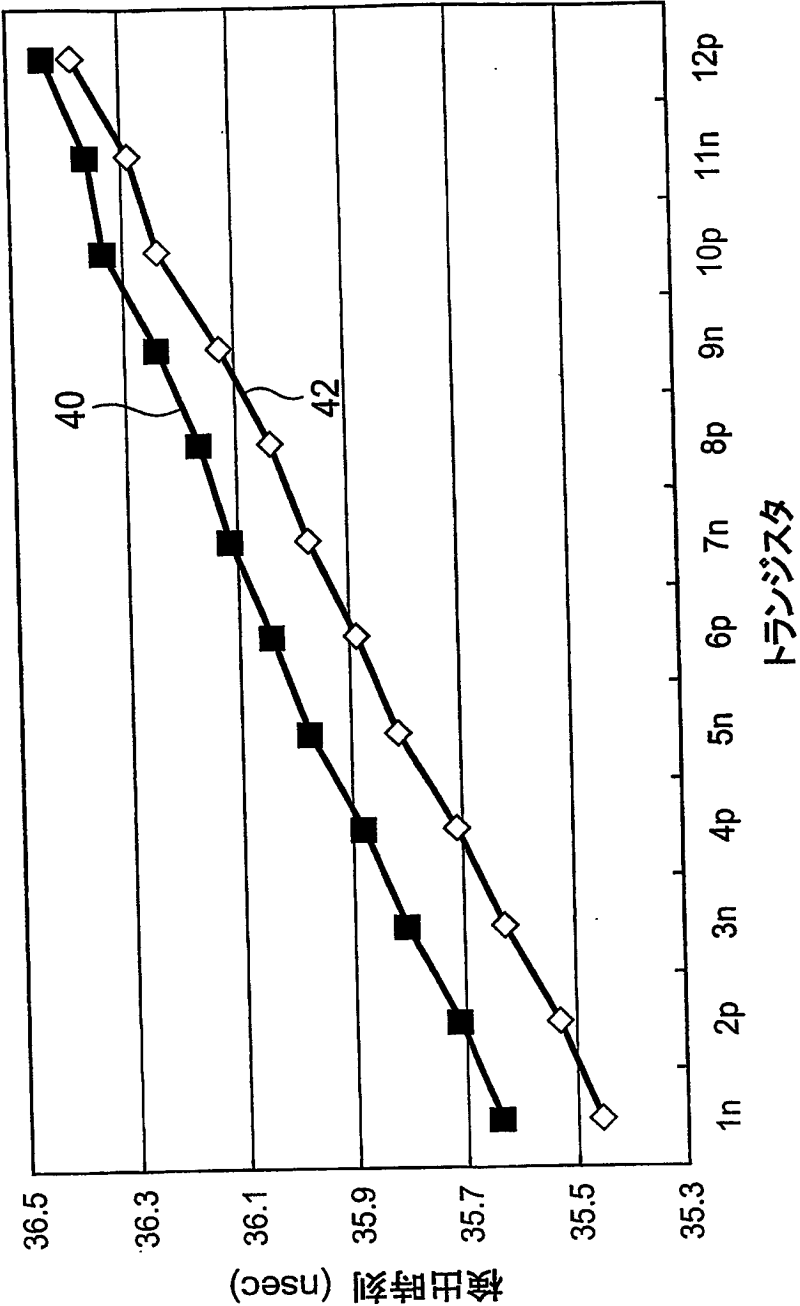


図5

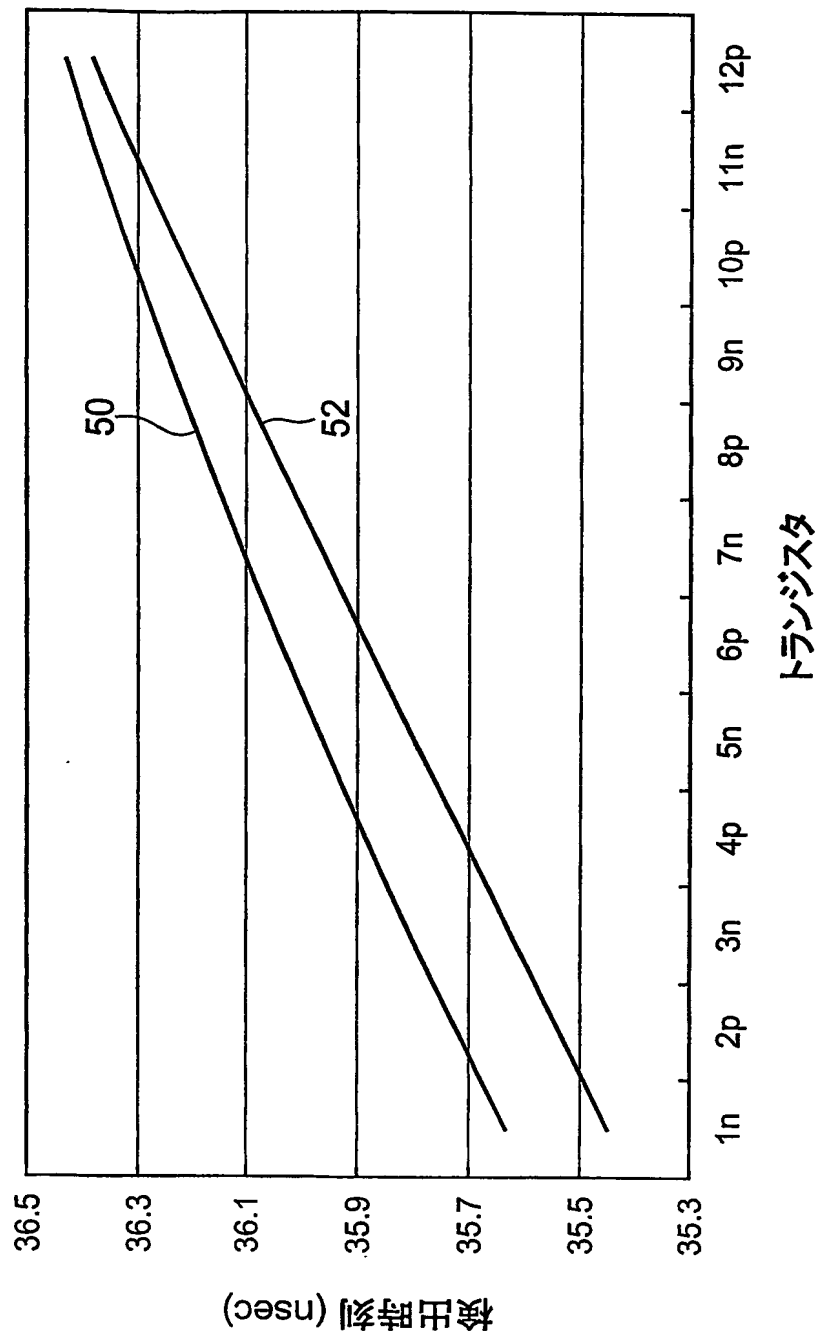


図6

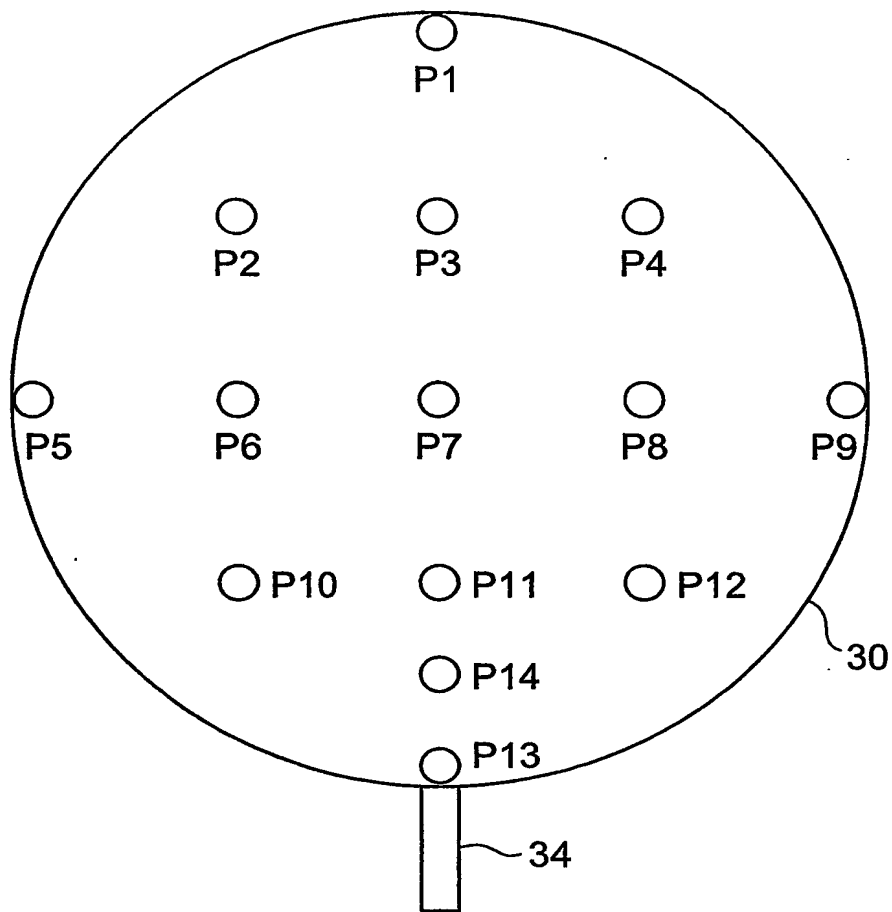


図7

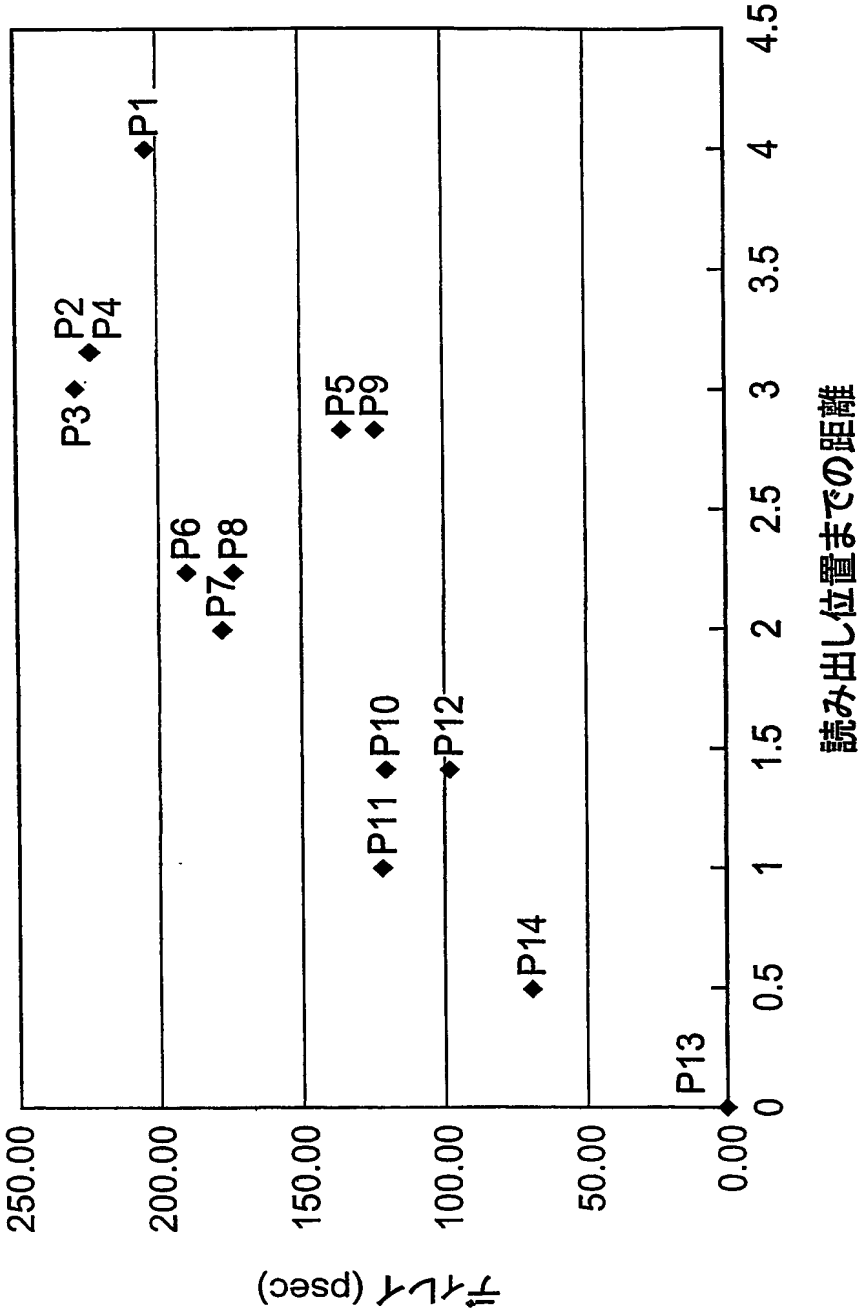


図8

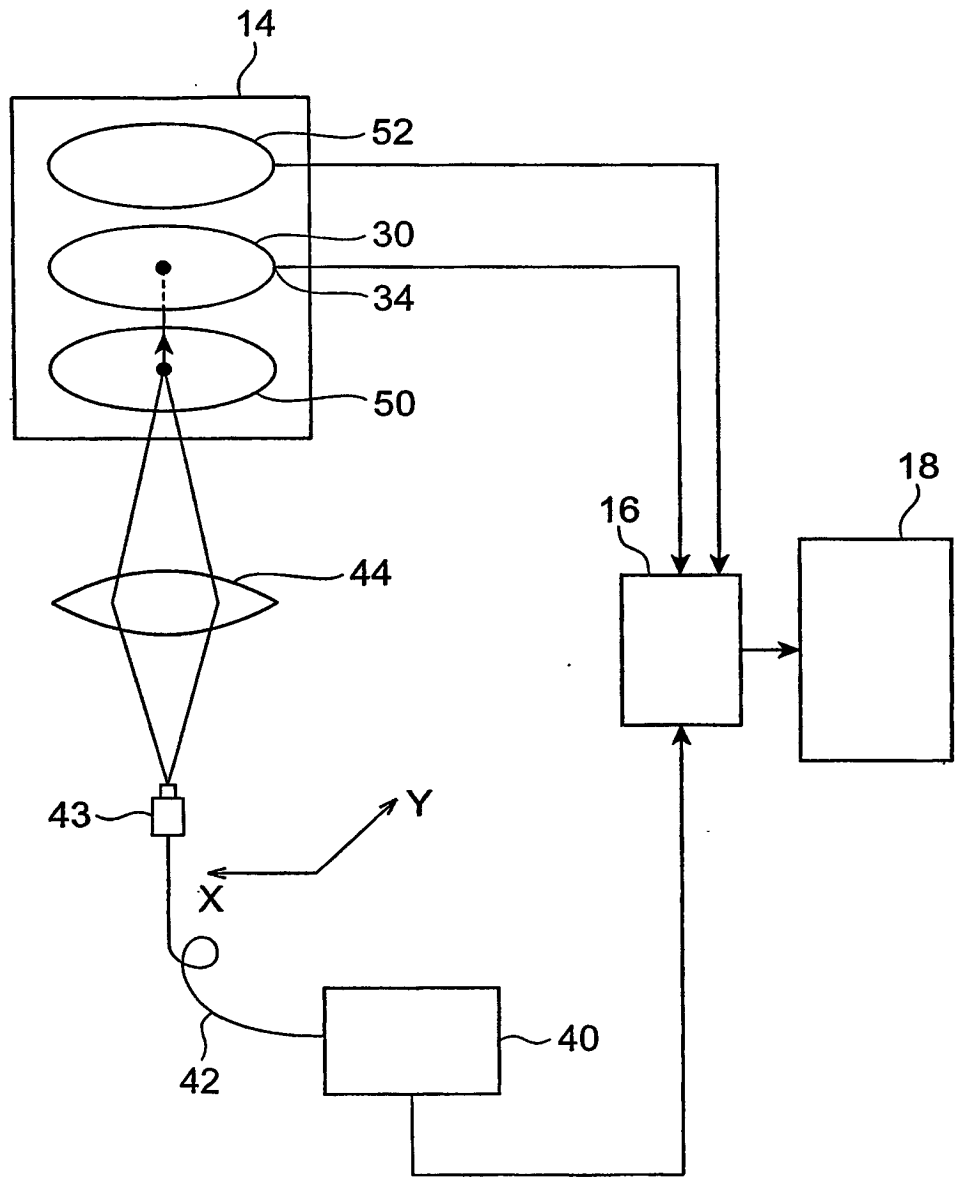


図9

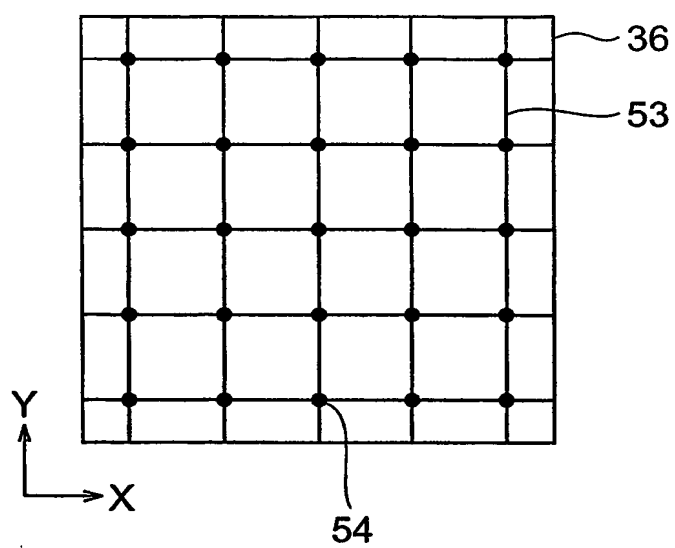


図10

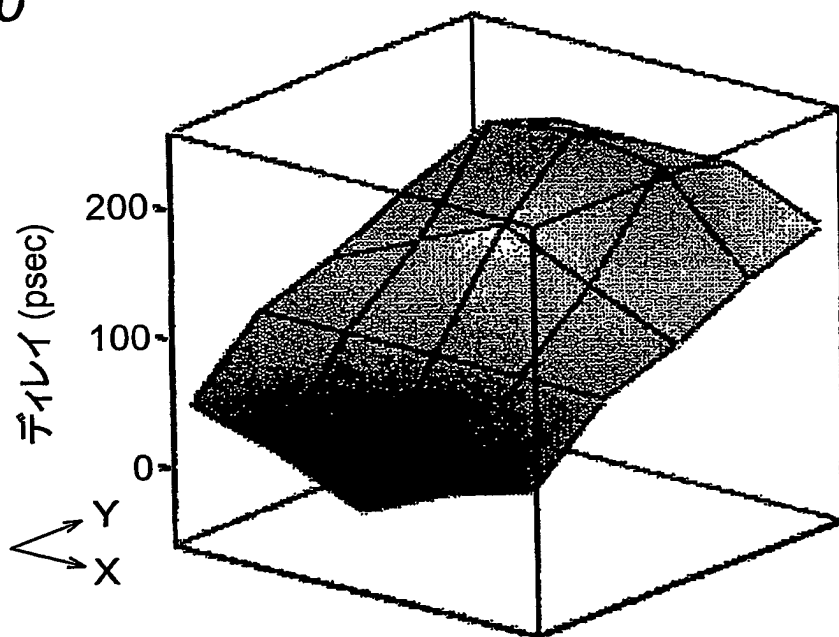


図11

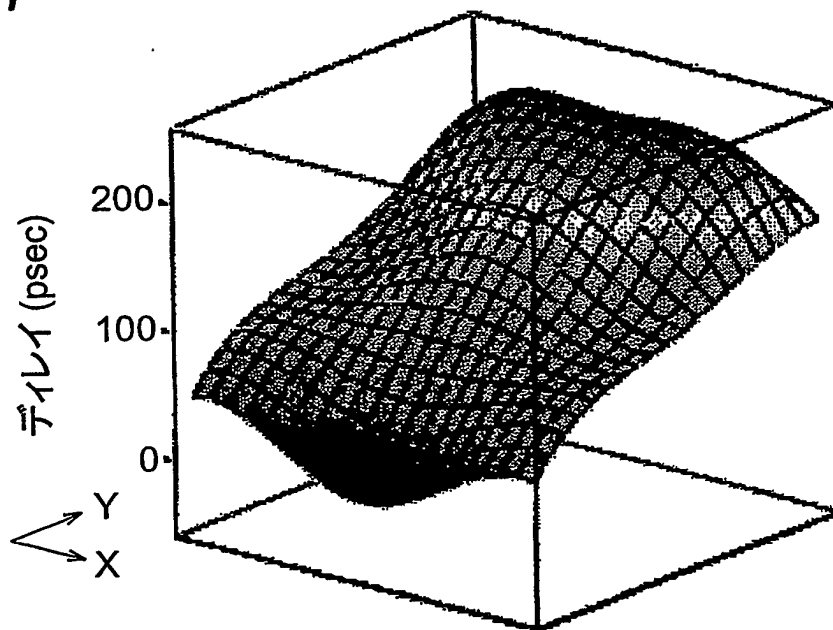


図12

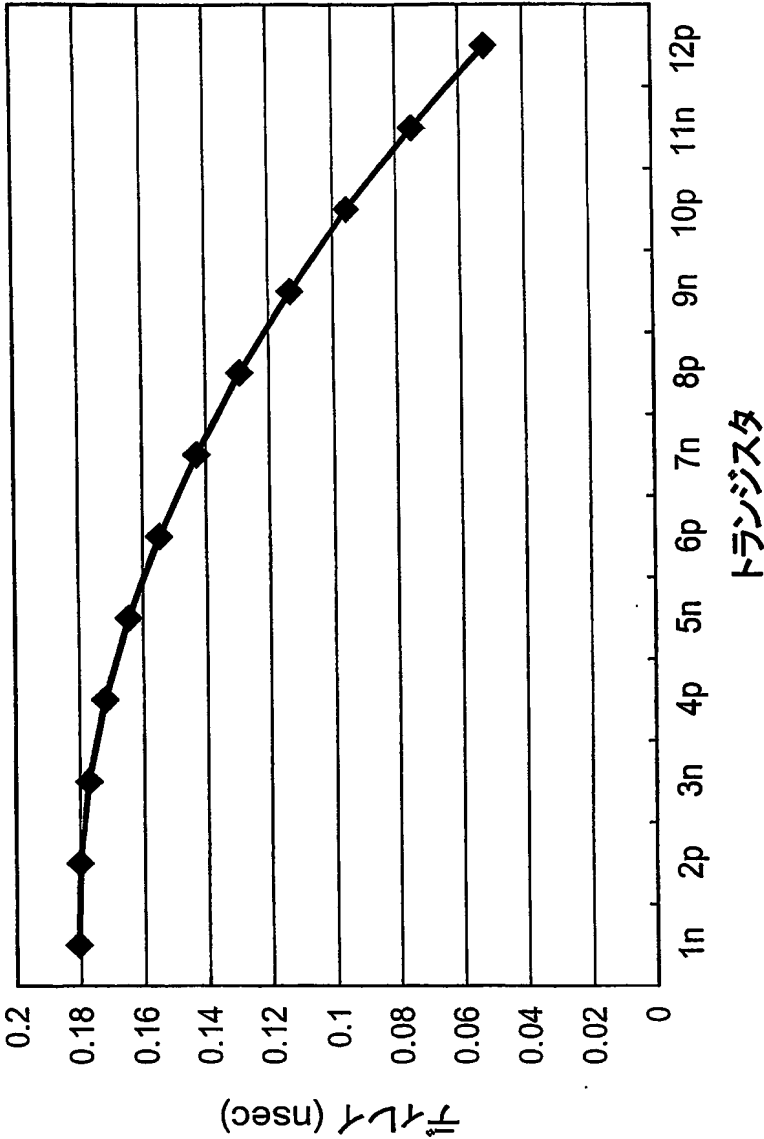


図13

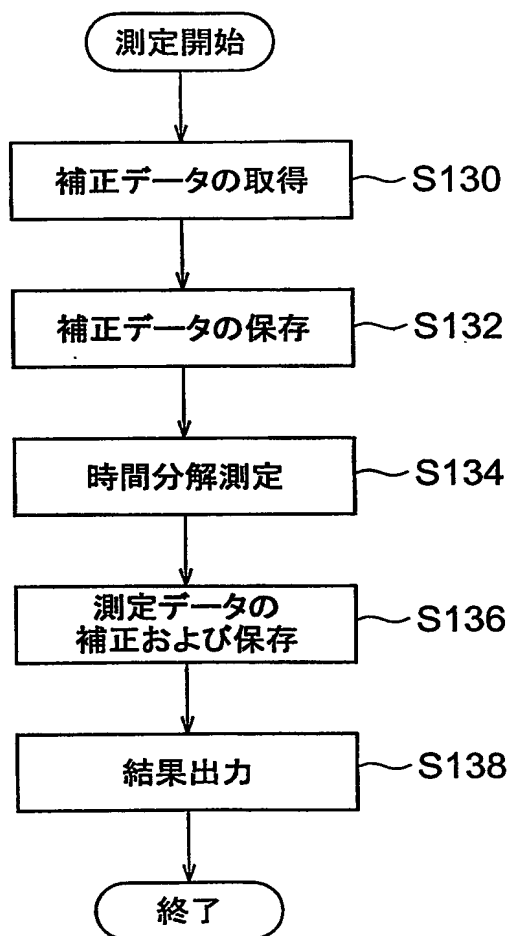
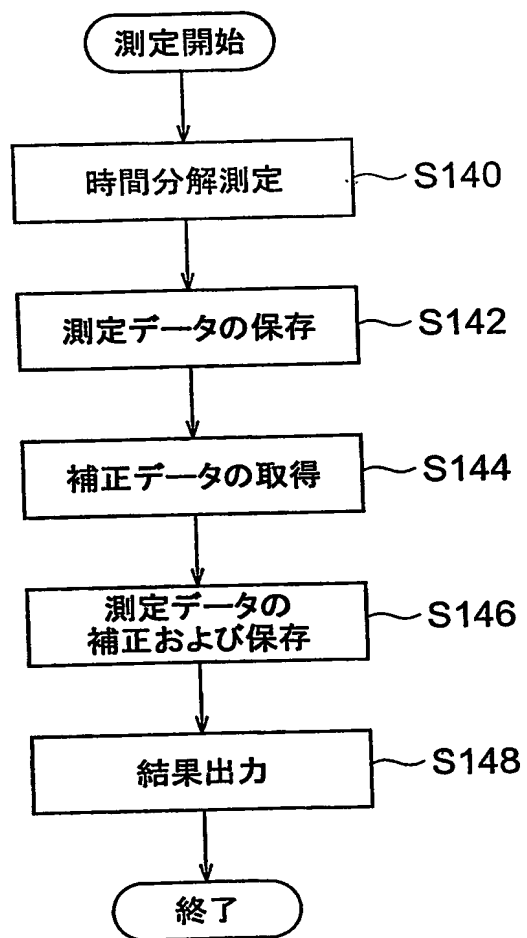


図14



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/009268

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G01N21/62

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G01N21/62-21/74, H01J43/00-43/30, H01L21/64-21/66

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2004	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST FILE (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 7-211280 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 11 August, 1995 (11.08.95), Full text; Figs. 1 to 6 (Family: none)	1-7
A	JP 60-220542 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 05 November, 1985 (05.11.85), Full text; Figs. 1 to 8 (Family: none)	1-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

03 August, 2004 (03.08.04)

Date of mailing of the international search report

24 August, 2004 (24.08.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl.⁷ G01N21/62

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl.⁷ G01N21/62-21/74, H01J43/00-43/30
H01L21/64-21/66

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2004年
日本国登録実用新案公報	1994-2004年
日本国実用新案登録公報	1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICSTファイル (JOIS)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 7-211280 A (浜松ホトニクス株式会社) 1995.08.11 全文, 第1-6図 (ファミリーなし)	1-7
A	JP 60-220542 A (浜松ホトニクス株式会社) 1985.11.05 全文, 第1-8図 (ファミリーなし)	1-7

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

03.08.2004

国際調査報告の発送日

24.8.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
横井 亜矢子

2W

9706

電話番号 03-3581-1101 内線 3290